

**Sensor zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten und Verfahren zu dessen Betrieb**

Die Erfindung betrifft einen Sensor zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten und ein Verfahren zu dessen Betrieb.

In dem Artikel "Micro Fluid Sensors<sup>†</sup> and Actuators" von G. Stemme, der 1995 in den Proceedings zum 6. internationalen Symposium on Micro Machine and Human Science auf den Seiten 45 - 52 erschienen ist, sind verschiedene Möglichkeiten dargestellt, wie Sensoren für die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten aufgebaut werden können. Unter anderem ist beschrieben, wie eine auf einer dünnen Membran angebrachte Leiterbahn durch einen elektrischen Strom auf einer konstanten Temperatur gehalten wird und die Energie zum Aufrechterhalten der Temperatur zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit dient. Nähere Beschreibungen dazu, wie ein solcher Sensor betrieben werden kann finden sich auf den Seiten 159 - 163 in dem Buch „Strömungs- und Durchflußmeßtechnik“ von Otto Fiedler, das 1992 im Oldenbourg-Verlag erschienen ist.

In dem Artikel „AMANDA-surface micromachining, molding, and diaphragm transfer“, der von W.K. Schomburg et. al. in der Zeitschrift Sensors and Actuators A, Band 76, auf den Seiten 343 bis 348 publiziert wurde, ist ein Sensor zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten beschrieben, bei dem der Druckabfall über einer Kapillare mit einem Drucksensor gemessen wird. Der Druckabfall ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und kann deshalb zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit herangezogen werden. Der in diesem Sensor verwendete Drucksensor enthält Dehnungsmessstreifen, die auf einer dünnen Membran angebracht sind.

Nachteilig bei beiden hier beschriebenen Methoden zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten ist, dass von außen auf das Gehäuse des Sensors einwirkende Kräfte sowie thermische Dehnungen des Gehäuses aufgrund von Änderungen der Umgebungstemperatur die Leiterbahn dehnen können, sodass sich deren elektrischer

Widerstand verändert, wodurch eine veränderte Strömungsgeschwindigkeit vorgetäuscht wird.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Sensor zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten zur Verfügung zu stellen, bei dem von außen einwirkende Kräfte und Temperaturänderungen nur noch in sehr geringem Maße Einfluss auf das Sensorsignal haben, und ein Verfahren zu dessen Betrieb anzugeben. Gelöst wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Patentansprüche 1 und 8. Die übrigen Ansprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von den Figuren 1 bis 5 und zwei Ausführungsbeispielen näher erläutert. Dabei zeigen die Figuren 1, 2 4 und 5 schematisch den Aufbau von 2 Sensoren. Die Figuren sind nicht maßstäblich gezeichnet, um sehr dünne bzw. kleine Strukturen neben vergleichsweise großen Strukturen deutlich werden zu lassen. Die Figur 3 zeigt Strom- und Spannungsverlauf bei einer Messung.

Die **Anwendungsbeispiele** beschreiben vorteilhafte Ausführungen der Sensoren.

Das **erste Anwendungsbeispiel** beschreibt eine zungenförmige Membranstruktur, die in einem Hohlraum frei aufgehängt ist. In dem von einer Gehäuseoberhälfte 1 und einer Gehäuseunterhälfte 2 gebildeten Hohlraum 7 wurde, wie in Figur 1 dargestellt ist, eine Membranstruktur 3 angebracht. Diese Membranstruktur 3 besteht aus zwei Lagen 4 bzw. 5, zwischen denen eine Leiterbahn 6 angebracht wurde, wie es in Figur 2 in Aufsicht schematisch gezeigt ist. Die hier gezeigte mäanderförmige Leiterbahn kann auch anders ausgeführt werden z.B. als bifilare Spirale. Dies hat den Vorteil, dass dies die Antenneneigenschaften der Leiterbahn 6 reduziert. Die Gehäuse wurden aus Polysulfon gefertigt und besitzen den fluidischen Zulauf 8 und Ablauf 9. Zulauf und Ablauf können auch anders als hier dargestellt z.B. diametral angeordnet sein. Die Membranlagen 4 und 5 wurden aus Polyimid und die Leiterbahn 6 aus Platin hergestellt. Die Dicke der Membranlagen

4 und 5 beträgt jeweils nur ca. 1  $\mu\text{m}$  und die Dicke der Leiterbahn 6 nur ca. 100 nm. Dadurch ist die Wärmekapazität der Membranstruktur 3 sehr gering und ihre Temperatur passt sich sehr schnell der Temperatur des Mediums an, das den Hohlraum 7 erfüllt. Es wurden ca. 7  $\mu\text{m}$  breite Leiterbahnen 6 mit Längen zwischen 1,9 und 34,7 mm hergestellt, deren elektrischer Widerstand zwischen 100  $\Omega$  und 10 k $\Omega$  lag. Die Außenabmessungen des Gehäuses betrugen in diesem Fall 5,5 · 4,5 · 1,2 mm<sup>3</sup>.

Ein an der Leiterbahn 6 vorbeiströmendes Medium kühlt die Leiterbahn 6 ab, wobei die Kühlleistung von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist. Der elektrische Widerstand der Leiterbahn 6 ist proportional zu ihrer Temperatur, deshalb ändert sich der Widerstand in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit.

Wegen der geringen Dicke der Membranstruktur 3 und ihrer damit verbundenen geringen Wärmekapazität kann sie sehr schnell durch einen elektrischen Strom durch die Leiterbahn 6 erwärmt und nach dessen Abschalten wieder auf die Temperatur des den Hohlraum 7 erfüllenden Mediums abgekühlt werden. Dies ermöglicht, wie weiter unten beschrieben wird, eine temperaturunabhängige Strömungsmessung mit nur einer Leiterbahn 6, hat aber den Nachteil, dass von außen auf das Gehäuse einwirkende mechanische Spannungen und Kräfte, wie sie z. B. durch Temperaturänderungen des Gehäuses 1 bzw. 2 auftreten können, zu Dehnungen der Membranstruktur 3 führen, die den Widerstand der Leiterbahn 6 ändern und so die Messung der Strömungsgeschwindigkeit beeinträchtigen.

Deshalb ist die Membranstruktur 3 über Stege 3a mit dem Gehäuse 1 bzw. 2 verbunden. Dadurch können von außen auf das Gehäuse einwirkende mechanische Spannungen und Kräfte, nur zu sehr geringen Dehnungen des Teiles 3b der Membranstruktur 3 führen, der den sensitiven Teil der Leiterbahn 6 enthält. Dadurch wird vermieden, dass Dehnungen der Leiterbahnen zu einer Änderung ihres elektrischen Widerstandes und damit zu einer störenden Be-

einflussung des Sensorsignals führen.

Es ist auch möglich, statt der Stege 3a einen festen Bestandteil mindestens einer der Gehäusehälften 1 oder 2 vorzusehen, an dem der Teil 3b der Membranstruktur angebracht ist.

Die Polyimidschichten 4 und 5 werden soweit technisch möglich in der gleichen Dicke hergestellt, damit die Leiterbahn 6 in der Mitte der Membranstruktur 3 auf der sogenannten neutralen Faser zu liegen kommt, die durch Biegungen der Membranstruktur 3 nicht gedehnt wird. Solche Biegungen der Membranstruktur 3 können z.B. auftreten, wenn das den Hohlraum 7 durchströmende Medium zu einer Art Flatterbewegung der Membranstruktur 3 führt, wie sie von Flaggen bekannt ist.

Durch die Leiterbahn 6 wird, wie es in Figur 3a gezeigt ist, mit einer Steuerspannung  $U$  einstellbare Stromquelle ein vorgegebener elektrischer Strom  $I_0$  geschickt, der so klein ist, dass er zu keiner wesentlichen Erwärmung der Leiterbahn 6 führt. Der elektrische Widerstand der Leiterbahn 6 ist von ihrer Temperatur - also der Temperatur des den Hohlraum 7 erfüllenden Mediums - abhängig. Deshalb stellt sich über der Leiterbahn 6 eine von der Medientemperatur abhängige Spannung  $u_0$  ein (vgl. Figur 3b), die nach Ablauf der Zeit  $\Delta t_1$  gespeichert wird.

Nach dem Speichern von  $u_0$  wird eine neue Steuerspannung  $U_1$  bestimmt, mit deren Hilfe ein Strom  $I_1$  durch die Leiterbahn 6 erzeugt wird. Die anfängliche Größe  $U_1$  der Steuerspannung ist der gemessenen Spannung  $u_0$  proportional. Der Proportionalitätsfaktor wird bei der Kalibrierung des Sensors geeignet festgelegt. Die Steuerspannung  $U$  und damit der Strom  $I$  durch die Leiterbahn 6 wird solange erhöht, bis die anfängliche Spannung  $u_1$ , die sich über der Leiterbahn 6 nach dem Einschalten des Stromes  $I_1$  einstellt, um einen vorgegebenen Betrag  $\Delta u$  erhöht ist.

Das Mess-Ergebnis ergibt sich, wie es in Figur 3c dargestellt ist, aus der Differenz  $\Delta U$  der Regelspannungen  $U_2$  und  $U_1$ , die den elektrischen Strömen  $I_2$  und  $I_1$  proportional sind.

Das dem Messverfahren zugrunde liegende Prinzip besteht darin, dass der Aufheizvorgang der Leiterbahn 6 analysiert wird. Das Messergebnis wird ermittelt aus der elektrischen Energie, die benötigt wird, um die Temperatur und damit den davon abhängigen Widerstand der Leiterbahn 6 um einen vorgegebenen Betrag zu erhöhen.

In der realisierten Schaltung wird dies dadurch erreicht, dass in einem Zeitintervall  $\Delta t_1$ , der von der Temperatur des den Hohlraum 7 erfüllenden Mediums abhängige Widerstand der Leiterbahn 6 mit einem kleinen Strom  $I_0$  gemessen wird und in dem anschließenden Zeitintervall  $\Delta t_2$  ermittelt wird, um wieviel der Strom  $I$  erhöht werden muss, um den Widerstand um einen vorgegebenen Betrag zu erhöhen.

Wegen der geringen Wärmekapazität des sensitiven Teils 3b der Membranstruktur 3 brauchte das Zeitintervall  $\Delta t_2$  nur 7 ms und das Zeitintervall  $\Delta t_1$  nur 20 bis 40 ms lang zu sein, um zuverlässige Messungen mit Luft als Medium ausführen zu können. Mit Hohlräumen 7 mit einem Querschnitt von  $390 \cdot 240 \mu\text{m}^2$  wurden Flussmessungen zwischen 100  $\mu\text{l/min}$  und 500  $\text{ml/min}$  durchgeführt. Durch eine Anpassung des Querschnittes ist es möglich den Messbereich zu verändern. Dabei ergibt sich für sehr kleine Flussraten die Einschränkung, dass ein sehr kleiner Querschnitt des Hohlraumes 7 die Gefahr dafür erhöht, dass im Medium enthaltene Partikel oder Gasblasen den Hohlraum 7 ganz oder teilweise verschließen und damit die Messergebnisse beeinträchtigen. Typischerweise sind Querschnitte von  $100 \cdot 100 \mu\text{m}^2$  noch geeignet. Es sind aber auch Querschnitte von  $10 \cdot 10 \mu\text{m}^2$  möglich, wenn mit sehr reinen Medien gearbeitet wird, wie dies z. B. bei der Dosierung von Medikamenten der Fall sein kann. Die Flussrate von Wasser wurde mit dem hier beschriebenen Sensor zwischen 4  $\mu\text{l/min}$  und 200  $\mu\text{l/min}$  gemessen. Diese Messung wurde aufgrund einer Ka-

librierung des Sensors mittels Wägung möglich. Die Kalibrierung für den Gasbetrieb wurde mit einem geeigneten Standardprüfmittel (Flusssensor der Firma MKS) durchgeführt. Bei gasförmigen Medien sind gegenüber flüssigen Medien um etwa einen Faktor 10 verminderte elektrische Leistungen für die Ansteuerung der Leiterbahn 6 erforderlich.

Der zungenförmig ausgebildete Teil 3b der Membranstruktur 3 behält auch dann seine Form bei, wenn die Strömungsrichtung nicht wie in Figur 2 durch Pfeile angedeutet, von der Aufhängung 3a der Membranstruktur 3 weggerichtet ist. Allerdings kann ein zungenförmig ausgebildeter Teil 3b der Membranstruktur 3 durch eine auf die Aufhängung zu gerichtete Strömung umgefaltet oder geknickt werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit einen kritischen Wert überschreitet. Ein umgefalteter oder umgeknickter Teil 3b der Membranstruktur 3 kann zu falschen Messwerten für die Strömungsgeschwindigkeit führen und sollte deshalb vermieden werden. Dies kann durch eine Begrenzung der möglichen Strömungsgeschwindigkeit oder eine Festlegung der Strömungsrichtung z. B. durch ein passives Ventil erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Aufhängung der Membranstruktur 3 anders zu gestalten, wie es im zweiten Anwendungsbeispiel dargestellt ist.

Es ist auch möglich, zwei Sensorelemente in getrennten Hohlräumen 7 nebeneinander anzubringen und durch vorgeschaltete passive Ventile sicherzustellen, dass der eine Hohlraum immer nur in eine Richtung durchströmt wird, während der andere Hohlraum immer in der entgegengesetzten Richtung durchströmt wird. Zungenförmige Teile 3b der Membranstruktur 3 können dann jeweils der Strömungsrichtung entsprechend ausgerichtet sein. Darüber hinaus ist es mit einer solchen Anordnung möglich, die Strömungsrichtung zu erfassen, indem festgestellt wird, welcher Sensor angesprochen hat.

In einem **zweiten Anwendungsbeispiel** wird ein Sensor beschrieben, bei dem die Membranstruktur 3 an vier Stegen 3a aufgehängt ist.

In Figur 4 ist eine Membranstruktur 3 mit Leiterbahnen 6 aus Gold gezeigt, die über vier Stege 3a mit dem Gehäuse 1 bzw. 2 verbunden ist. Vorteilhaft bei dieser Ausgestaltung ist, dass der Teil 3b der Membranstruktur 3 nicht umklappen oder umknicken kann, wenn sich die Strömungsrichtung umkehrt. Andererseits ist es bei dieser Ausgestaltung wichtig, dass die Stege 3a der Membranstruktur 3 flexibel genug sind, um mechanische Spannungen, die vom Gehäuse ausgehen, nicht oder nur wenig auf den Teil 3b der Membranstruktur zu übertragen.

Eine andere Möglichkeit, die Übertragung von mechanischen Spannungen vom Gehäuse auf die Membranstruktur 3 zu übertragen, besteht darin, die Membranstruktur 3 im wesentlichen schlaff auszubilden, sodass sie, wie es in Figur 5 gezeigt ist, im Hohlraum 7 etwas durchhängt. Wenn sich eine Dehnung des Gehäuses auf eine solche Membranstruktur 3 überträgt, ändert sich nur das Ausmaß, um das die Membranstruktur 3 durchhängt, ohne dass sich eine wesentliche Änderung der mechanischen Spannung der Membran einstellt.

**Patentansprüche**

1. Sensor zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Gasen oder Flüssigkeiten, bestehend aus
  - a) einer Trägermembran im wesentlichen in Form einer Fahne und die nur zu einem kleinen Teil ihres Umfangs als Halteelement ausgebildet ist, wobei die Halteelemente so angeordnet sind, dass nur ein Randbereich der Trägermembran mechanischen Spannungen ausgesetzt wird, und
  - b) einer elektrischen Leiterbahn (6) mit Zuleitungen auf der Trägermembran, wobei die elektrische Leiterbahn (6) durch einen elektrischen Strom gegenüber der Umgebung erwärmt werden kann.
2. Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Membran aus einem Polymer besteht.
3. Sensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Leiterbahn (6) aus einem Metall besteht.
4. Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Trägermembran aus zwei Lagen (4, 5) aufgebaut ist, welche die elektrische Leiterbahn (6) umschließen.
5. Sensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Lagen (4, 5) der Trägermembran gleich dick sind.
6. Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Trägermembran in einem Gehäuse mit fluidischen Zu- und Ableitungen (8, 9) derart gehaltert ist, dass das Medium im wesentlichen parallel zur Ebene der Trägermembran fließt.
7. Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Trägermembran an vier Punkten fixiert ist



und leicht durchhängt.

8. Verfahren zum Betrieb eines Sensors gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7 mit folgenden Verfahrensschritten

- a) Beaufschlagen der elektrischen Leiterbahn 6 mit einem anwachsenden elektrischen Strom  $I$  solange, bis der Spannungsabfall über der Leiterbahn 6 sich um einen vorgegebenen Wert  $\Delta u$  erhöht hat,
- b) Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit aus dem  $\Delta u$  mit Hilfe einer Kalibrierkurve und
- c) Abkühlen der Leiterbahn (6) durch Reduktion des Stromes und gegebenenfalls Durchführen weiterer Messungen gemäß den Schritten a) und b).

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
28. November 2002 (28.11.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/095338 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G01F 1/684**

**DITTMANN, Dirk** [DE/DE]; Bärenweg 12, 76149 Karlsruhe (DE). **SCHLOTE-HOLUBEK, Klaus** [DE/DE]; Dreisamstr. 24, 76199 Karlsruhe (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/04323

(22) Internationales Anmeldedatum:  
19. April 2002 (19.04.2002)

(74) **Gemeinsamer Vertreter: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH**; Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) **Bestimmungsstaaten (national):** JP, US.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

(30) Angaben zur Priorität:  
101 24 964.0 21. Mai 2001 (21.05.2001) DE

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH** [DE/DE]; Weberstr. 5, 76133 Karlsruhe (DE).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(72) **Erfinder; und**

(75) **Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHOMBURG, Werner** [DE/DE]; Holunderweg 8, 76327 Pfinztal (DE).

(54) **Title:** SENSOR FOR THE MEASUREMENT OF FLOWSPEEDS AND METHOD FOR OPERATING THE SAME

(54) **Bezeichnung:** SENSOR ZUR MESSUNG VON STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN UND VERFAHREN ZU DESSEN BETRIEB

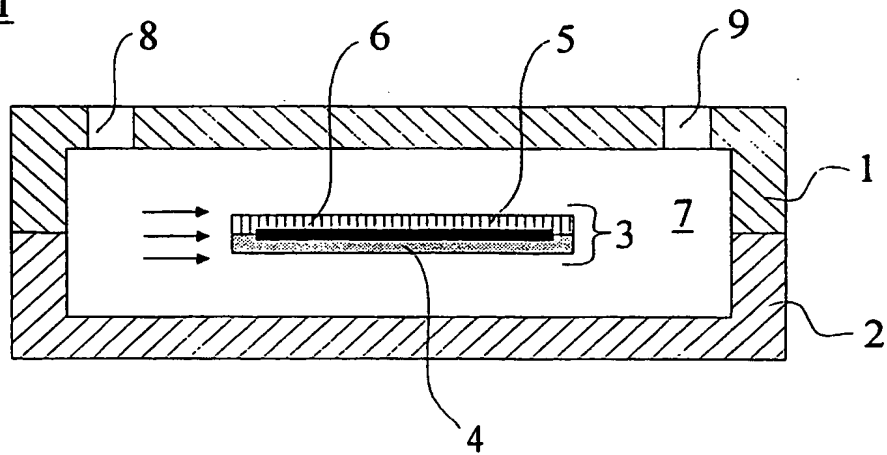
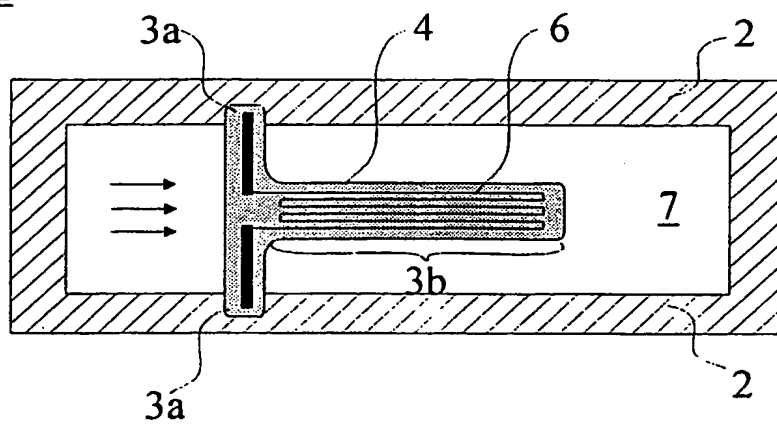
(57) **Abstract:** The invention relates to a sensor for the measurement of flowspeeds and a method for operating the same. The aim of the invention is to embody the sensor such that externally acting forces and temperature changes have only a minimal effect on the sensor signal. Said aim is achieved, whereby a support membrane, essentially in the form of a vane and embodied as a fixing element for only a small part of the circumference thereof, is arranged such that only a boundary region of the support membrane is subject to mechanical tension and an electrical conductor with supply lines is arranged on the support membrane.

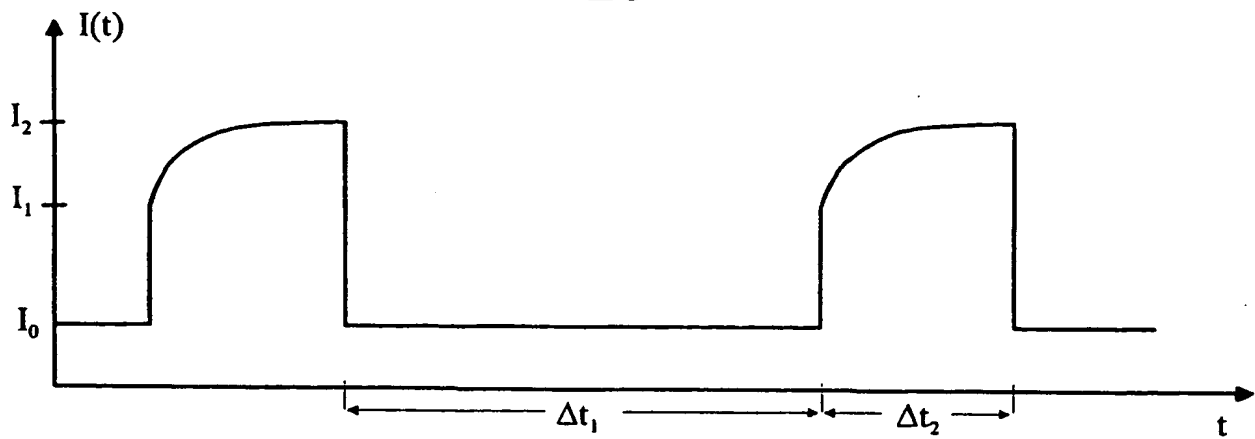
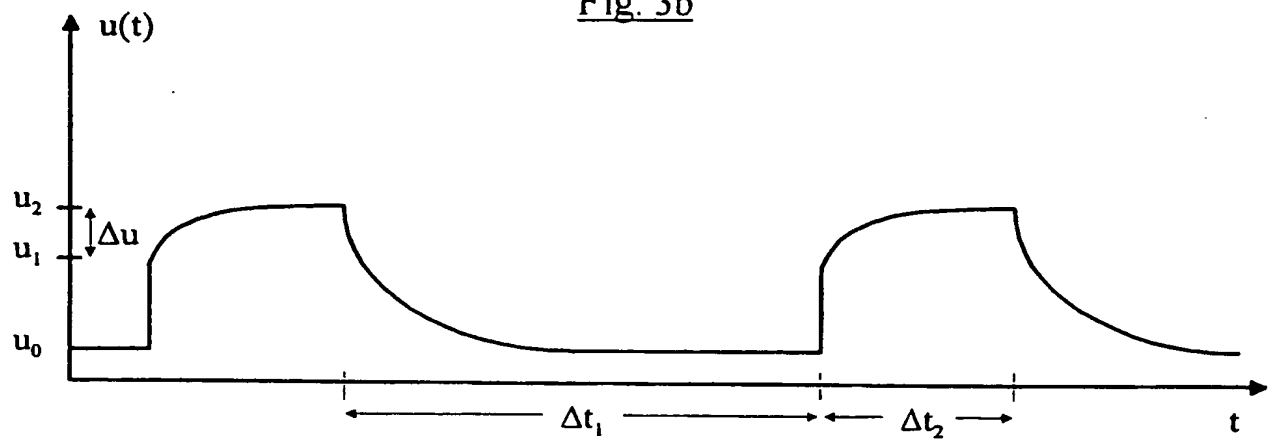
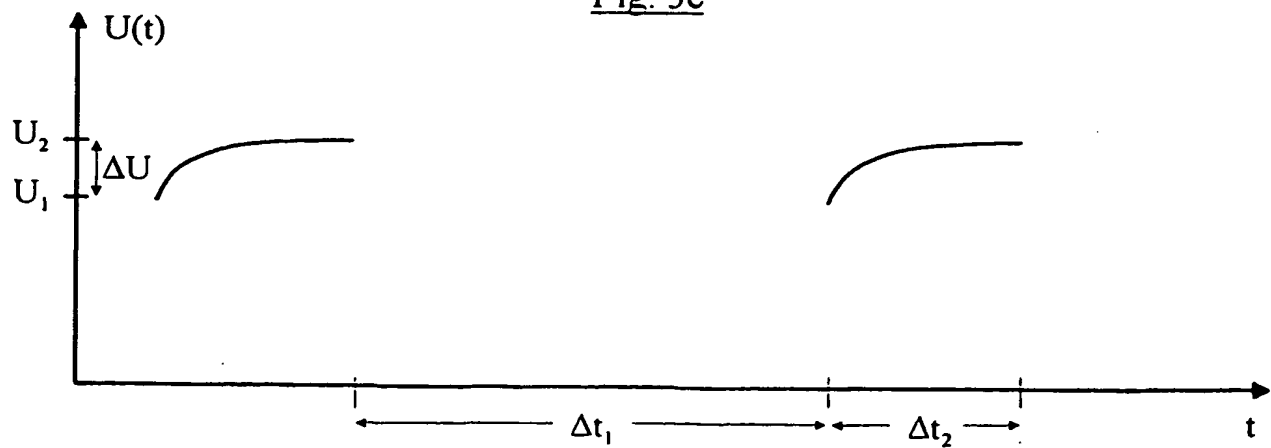
(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft einen Sensor zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten und ein Verfahren zu dessen Betrieb. Aufgabe der Erfindung ist es, den Sensor so auszugestalten, dass von außen einwirkende Kräfte und Temperaturänderungen nur noch in sehr geringem Maße Einfluss auf das Sensorsignal haben. Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Trägermembran im wesentlichen in Form einer Fahne und die nur zu einem kleinen Teil ihres Umfangs als Halteelement ausgebildet ist, wobei die Halteelemente so angeordnet sind, dass nur ein Randbereich der Trägermembran mechanischen Spannungen ausgesetzt wird, und eine elektrische Leiterbahn mit Zuleitungen auf der Trägermembran.



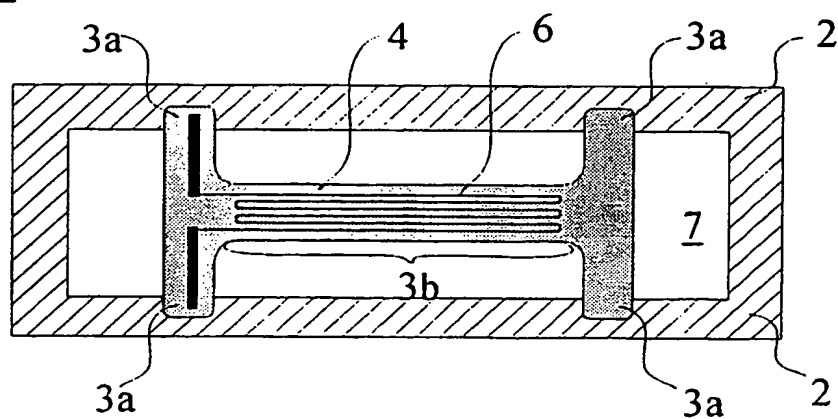
WO 02/095338 A2

1/3

Fig. 1Fig. 2

2/3  
Fig. 3aFig. 3bFig. 3c

3/3

Fig. 4Fig. 5